

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСКУССТВЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье представлено обоснование предложенного авторами метода искусственного нагружения однофазных асинхронных электродвигателей после ремонта. Основной целью статьи является проведение исследований по функционированию обмоток электрических машин под номинальным током. При использовании метода искусственного нагружения возможно получение режима, эквивалентного нагрузочному. Эквивалентный ток статора электродвигателя в таком режиме будет соизмерим с номинальным током. Для подтверждения представленного авторами метода приводятся результаты моделирования процесса искусственного нагружения однофазного асинхронного электродвигателя. Главными задачами исследования являются определение параметров схемы замещения электродвигателя и получение оптимальных параметров процесса искусственного нагружения. Результатами решения поставленных авторами задач являются модель асинхронного однофазного электродвигателя, основные параметры которой совпадают с номинальными, и графики эквивалентного тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, динамическое нагружение, режим противовключения, электрический ток, механическая мощность, коммутация, частота сети.

В НАСТОЯЩЕЕ время испытания асинхронных трёхфазных двигателей (АТД) проводятся по упрощённому сценарию. Причиной этого является сложность испытательного оборудования [1]. В то же время, наряду с уменьшением затрат на оборудование увеличивается число электродвигателей, выходящих из строя. Это приводит к увеличению количества серьёзных аварий на судах и, как следствие, простоя судов.

Однофазные асинхронные электродвигатели (ОАД) применяются только для вспомогательного оборудования судов [2], поэтому выход из строя таких электродвигателей не повлечёт за собой существенных экономических последствий. В то же время проведение проверки однофазных асинхронных электродвигателей может быть оправдано для крупных судоремонтных предприятий. Для этого необходимо большое количество машин трёхфазного и однофазного тока, подвергающихся ремонту. В этом случае, при отсутствии должного контроля технического состояния электродвигателей, количество вышедших из строя единиц окажется существенным [3], что не может быть не замечено судовладельцами и представителями судоремонтных предприятий. Таким образом, процесс испытаний однофазных электродвигателей должен быть нетрудоёмким и в то же время надёжным [4]. Это условие обеспечит большой оборот испытуемого оборудования, что повысит целесообразность испытания электродвигателей, которые нашли применение в маломощных электроприводах вспомогательных механизмов. Кроме того, оборудование испытательного стенда, где проходят испытание асинхронные двигатели, должно иметь как можно меньшую стоимость. Всё перечисленное возможно только при использовании метода искусственного нагружения (ИН) [5]. Этот метод уже апробирован авторами на судоремонтных предприятиях Камчатского края и одинаково применяется как для трёхфазных, так и для однофазных асинхронных электродвигателей.

Для определения дальнейшего направления исследования были рассмотрены характеристики двигателей при различных способах включения. ОАД с пусковой обмоткой являются достаточно распространёнными (рис. 1, а), это объясняется простотой схемы включения. Возникновение пускового момента двигателя обеспечивается фазовым сдвигом между токами и магнитодвижущими силами пусковой и рабочей обмоток. Это достигается за счёт выполнения неравенств $r_w < r_s$ и $x_w > x_s$, где r_w , r_s — активные сопротивления рабочей и пусковой обмоток соответственно, x_w ,

x_s — индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток соответственно. Необходимым требованием к токовым реле, осуществляющим коммутацию обмотки S при пуске асинхронного двигателя (АД), является высокая надёжность.

Так как пусковая обмотка рассчитана на работу в кратковременном режиме, то в случае выхода из строя реле произойдет перегрев и отказ пусковой обмотки. Однофазный асинхронный двигатель с дополнительным резистором имеет низкие эксплуатационные показатели. При этом коэффициент мощности ($\cos\phi$) равен примерно 0,5 – 0,6; значение КПД варьируется в пределах 0,4 – 0,7; пусковая способность M_n/M_n — в пределах 1 – 1,5.

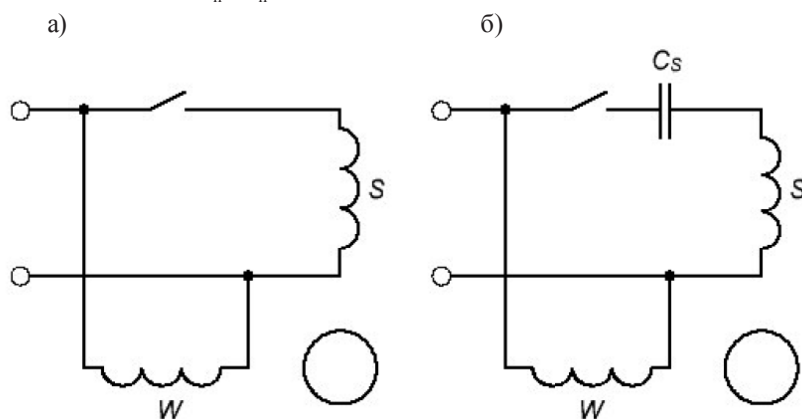


Рис. 1. Схемы включения ОАД с КЗ ротором:
а) с пусковой обмоткой; б) с пусковым конденсатором

Простота конструкции могла стать определяющим фактором распространения таких видов ОАД, но необходимо отметить, что рассматриваемые двигатели имеют существенные недостатки. При работе в составе электропривода возможен выход из строя ввиду низкого пускового момента, так как при наличии значительных сил сопротивления ротора электромагнитный момент двигателя будет слишком мал для их преодоления, и двигатель перейдет в режим короткого замыкания.

Всё это объясняет распространение ОАД с пусковым конденсатором, которые лишены перечисленных недостатков (рис. 1, б). В цепи пусковой обмотки S таких двигателей установлен конденсатор C , правильный подбор ёмкости которого обеспечивает необходимые условия пуска. Такие ОАД имеют эксплуатационные характеристики аналогичные характеристикам ОАД с дополнительным сопротивлением пусковой обмотки, но пусковые характеристики значительно выше. При этом пусковая способность (M_n/M_n) достигает значений от 1 до 1,5. Эксплуатационные характеристики таких ОАД аналогичны рассмотренным ранее, за исключением высокой пусковой способности M_n/M_n (от 2 до 2,5). Данный тип АДО имеет существенный недостаток: для создания кругового вращающегося магнитного поля используются два конденсатора значительных размеров. Наличие дополнительных элементов значительно снижает эксплуатационную надёжность, что нередко является причиной выхода из строя электродвигателя. Именно это объясняет наличие большого количества таких двигателей на полках судоремонтных предприятий.

В ходе данного исследования были решены две основные задачи. Первая — определение параметров схемы замещения (СЗ) ОАД. Вторая — определение параметров режима искусственного нагружения. В системе уравнений (1) для СЗ ОАД первый индекс обозначает принадлежность к одному из опытов: 0 — параметры и переменные, измеренные и рассчитанные из опыта ХХ, k — параметры и переменные, измеренные и рассчитанные из опыта КЗ. Вторые индексы обозначают принадлежность к статорным обмоткам двигателя: w — к рабочей обмотке, s — к пусковой обмотке.

$$\begin{aligned}
 z_{0w} &= \frac{U_{0w}}{I_{0w}}; & r_{0w} &= \frac{P_{0w}}{I_{0w}^2}; & x_{0w} &= \sqrt{z_{0w}^2 - r_{0w}^2}; \\
 z_{kw} &= \frac{U_{kw}}{I_{kw}}; & r_{kw} &= \frac{P_{kw}}{I_{kw}^2}; & x_{kw} &= \sqrt{z_{kw}^2 - r_{kw}^2}; \\
 x_{0w} &= x_{m[w]} + x_{s\sigma w}; & x_{kw} &= x_{s\sigma w} + x_{r\sigma[w]}; \\
 r_{0w} &= r_{m[w]} + r_{s\sigma w}; & r_{kw} &= r_{s\sigma w} + r_{r[w]}; \\
 x_{s\sigma w} &= x_{r\sigma[w]}; & r_{s\sigma w} &= r_{r[w]}; & x_{s\sigma s} &= x_{r\sigma[s]}; & r_{s\sigma s} &= r_{r[s]}; \\
 z_{0s} &= \frac{U_{0s}}{I_{0s}}; & r_{0s} &= \frac{P_{0s}}{I_{0s}^2}; & x_{0s} &= \sqrt{z_{0s}^2 - r_{0s}^2}; \\
 z_{ks} &= \frac{U_{ks}}{I_{ks}}; & r_{ks} &= \frac{P_{ks}}{I_{ks}^2}; & x_{ks} &= \sqrt{z_{ks}^2 - r_{ks}^2}; \\
 x_{0s} &= x_{m[s]} + x_{s\sigma s}; & x_{ks} &= x_{s\sigma s} + x_{r\sigma[s]}; \\
 r_{0s} &= r_{m[s]} + r_{s\sigma s}; & r_{ks} &= r_{s\sigma s} + r_{r[s]};
 \end{aligned} \quad (1)$$

Для учёта насыщения от полей прямой и обратной последовательностей к ОАД подключались два источника напряжения, сдвинутых во времени на $\frac{1}{4}$ периода, а амплитуды напряжений источников подбирались с учётом обеспечения равенства МДС обеих обмоток.

Приведённые уравнения позволяют создать математическую модель ОАД, пригодную для анализа основных режимов работы ОАД, однако при исследованиях систем автоматизированного управления ОАД и формирования его пуско-тормозных процессов необходимо учесть изменяющееся насыщение магнитной системы. С этой целью в модель вводится выраженная в относительных единицах и аппроксимированная кривая намагничивания, с помощью которой определяется зависимость

$$X_m = f(\Psi), \quad (2)$$

где X_m — индуктивное сопротивление рассеяния фазы, Ψ — фазовый сдвиг между напряжением и током в фазе.

На рис. 2 представлена компьютерная модель, разработанная в Simulink [6].

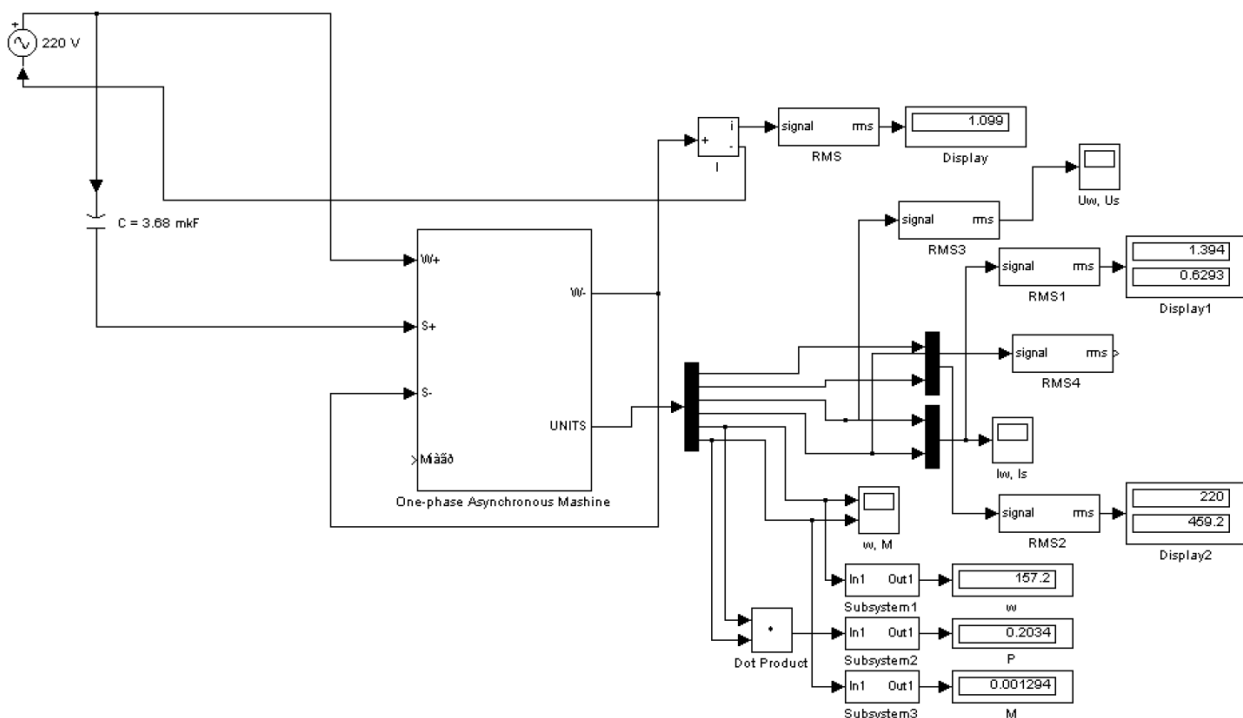


Рис. 2. Модель однофазного электродвигателя в Simulink

Моделирование процесса искусственного нагружения невозможно без наличия адекватной модели испытуемого ОАД [7]. Разработанная модель прошла проверку на адекватность путём получения номинальной частоты вращения и номинального тока (НТ) при подключении номинальной нагрузки. Результаты проверки модели ОАД АВЕ-071 ($P_n = 180$ Вт; $n_n = 1350$ об/мин; $I_n = 1,38$ А; $U_n = 220$ В; $\cos\varphi_n = 0,94$; $\eta_n = 0,63$) представлены на рис. 3.

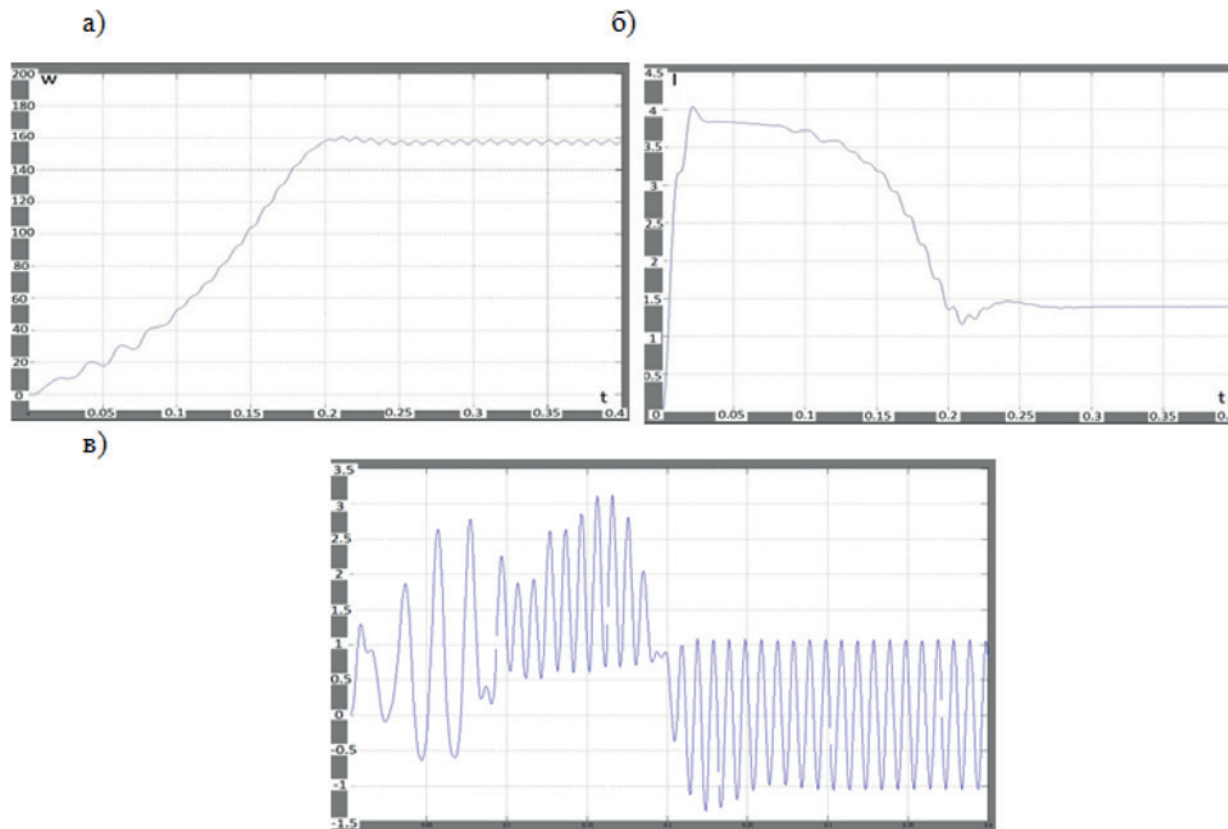


Рис. 3. Скорость вращения (а), ток статора (б) и напряжение на статоре (в) в номинальном режиме ОАД

На рис. 3 видно, что параметры представленной модели совпадают с номинальными параметрами с некоторыми допущениями. Из результатов моделирования можно сделать вывод о соответствии представленной математической модели ОАД реальным ОАД. На втором этапе целью моделирования процесса ИН ОАД являлось получение среднего тока на статоре, значение которого соизмеримо с номинальным значением.

В настоящее время перспективными являются частотные методы, предполагающие питание электродвигателя от преобразователя частоты. Наиболее перспективными являются схемные решения, не требующие измерения механических параметров, в частности, частоты вращения вала двигателя. Основными параметрами, используемыми для оценки технического состояния, являются энергетические параметры, токи и напряжения. Метод ИН предполагает введение возмущающих воздействий на работу ОАД с целью получения режима, соответствующего режиму нагружения с соответствующими ему параметрами.

На рис. 4 представлена механическая характеристика электродвигателя в режиме ИН.

Первоначально электродвигатель работает на своей механической характеристике, его номинальному моменту соответствует точка *b*. Далее путём изменения частоты питающего напряжения двигатель переходит на работу по второй механической характеристике, переводится в режим рекуперативного торможения. На отрезке *cd* происходит торможение до установившейся скорости в соответствии с частотой сети [8].

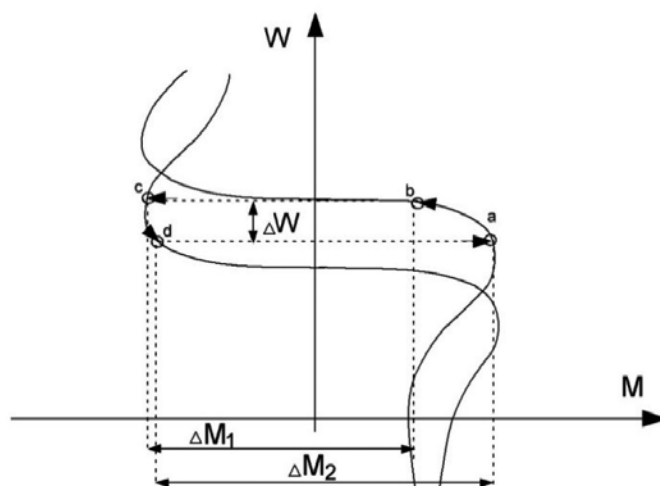


Рис. 4. Механическая характеристика АД в режиме искусственного нагружения путём изменения частоты питающего напряжения

Разгон электродвигателя осуществляется путем изменения частоты питающего напряжения на первоначальную. Двигатель переходит в точку *a* характеристики и начинает разгон до точки *b*. Для поддержания непрерывного режима динамического нагружения цикл повторяется.

На рис. 5 представлены результаты моделирования ИН ОАД [9].

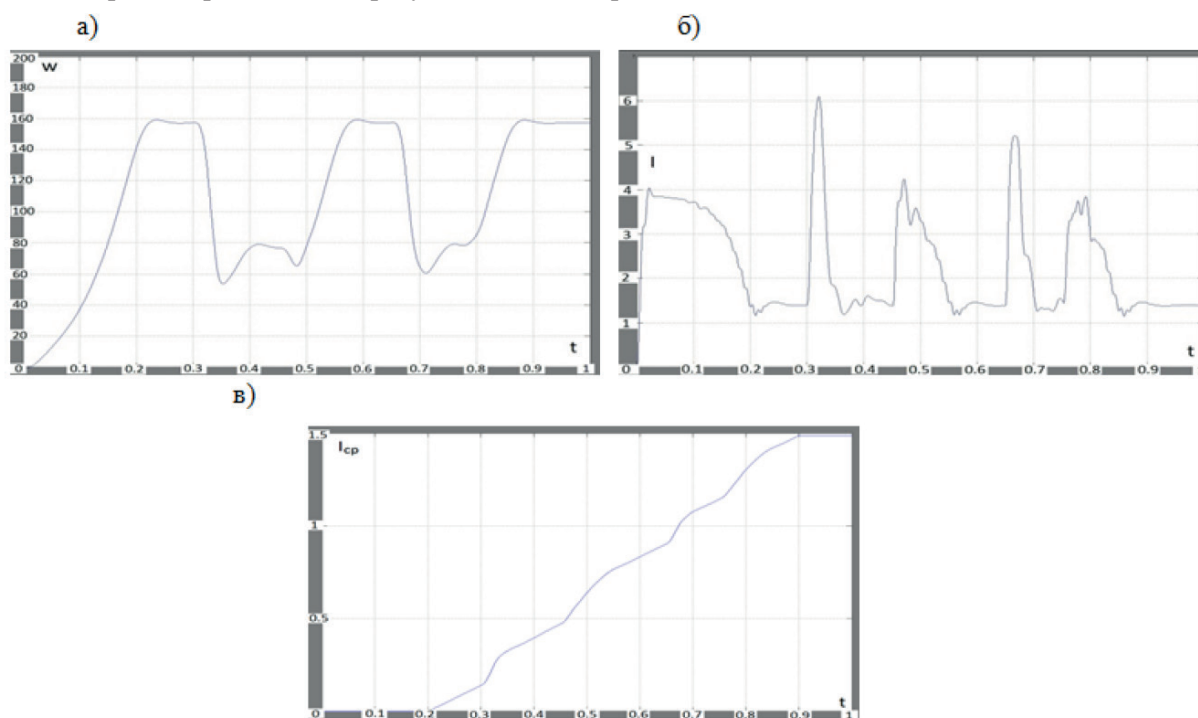


Рис. 5. Скорость вращения (а), ток статора (б) и эквивалентный ток (в) статора, полученные при моделировании испытаний ОАД

ИН производилось путём циклического изменения частоты питающего напряжения, что привело к изменению скорости вращения и тока статора ОАД соответственно. На рис. 5, *а* представлен график скорости электродвигателя. На графике видно, что циклическое изменение частоты приводит к циклическому изменению скорости, что позволяет оценить время протекания процесса нагружения. На рис. 5, *б* представлен график изменения тока статора. При изменении ча-

стоты напряжения циклический ток статора также изменяется. Для получения среднего значения тока на участке в Simulinc проводилось интегрирование по времени. Из результатов интегрирования, представленных на рис. 5, в, можно сделать вывод, что среднее значение полученного тока практически совпадает с номинальным значением, указанным в паспортных данных, тем самым результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности получения НТ [10] с использованием метода ИН.

Из проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Математическое моделирование процессов в асинхронном электродвигателе позволяет решить некоторые задачи, решение которых могло быть затруднительным при проведении реальных экспериментов. На практике проведение исследования с интегрированием мгновенных значений является затруднительным, но применение полученных результатов в процессе испытания ОАД после ремонта является оправданным.

2. Испытания однофазных асинхронных электродвигателей методом искусственного нагружения позволяют получить режим, эквивалентный нагрузочному. Обмотки статора в таком режиме проходят проверку под номинальным током. В настоящее время процесс испытаний является упрощенным и не позволяет оценить степень конструктивной надежности машины, так как режимы проверки не соответствуют реальным эксплуатационным режимам. Данный способ позволит получить более широкую картину технического состояния и позволит оценить работу машины в составе электропривода.

3. Данный метод позволяет добиться совершенствования испытательного оборудования, что выражается в существенном снижении массогабаритных характеристик путём исключения механических соединений между нагрузкой и испытуемым электродвигателем. Получение процесса искусственного нагружения с циклическим изменением параметров электродвигателя в настоящее время является возможным с применением высокоточных микропроцессорных устройств в схеме управления и применением силовых тиристорных ключей в силовой цепи испытательного стенда.

4. Актуальным в настоящее время является процесс отдачи электроэнергии в сеть. Процесс искусственного нагружения сопровождается режимом генераторного торможения, что предполагает возврат энергии. Однако для бытовых приборов и вспомогательных электроприводов на судах в основном используются асинхронные двигатели малой мощности, в связи с чем процесс отдачи электроэнергии в сеть может оказаться оправданным только при совместном проведении испытаний ОАД и АТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henao, G. A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti // *Industrial Electronics Magazine*. — 2014. — Vol. 8. — № 2. — Pp. 31–42.
2. Бейерлейн Е. В. Испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки / Е. В. Бейерлейн, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // *Известия Томского политехнического университета*. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 153–156.
3. Федоров М. М. К вопросу построения систем диагностики неисправностей асинхронных электродвигателей / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // *Электротехника и электромеханика*. — 2006. — № 2. — С. 59–61.
4. Хомутов С. О. Повышение надежности работы асинхронных двигателей путем разработки методики и технических средств для определения эталонных значений диагностического параметра их изоляции / С. О. Хомутов // *Ползуновский вестник*. — 2002. — № 1. — С. 26–32.
5. Марченко А. А. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 6. — С. 125.

6. Teaching of simulation an adjustable speed drive of induction motor using MatLab/Simulink in advanced electrical machine laboratory / A. Saghaforia, H. W. Ping, M. N. Uddin, A. Amindoust // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. — 2013. — Vol. 103. — Pp. 912–921. DOI:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

7. Воронцов А. Г. Моделирование машин возвратно-поступательного действия на пакете MatLab / А. Г. Воронцов, И. В. Дегтяренко // Компьютерные и информационные технологии в инженерной и управленческой деятельности. — 2000. — № 2. — С. 39–44.

8. Марченко А. А. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Фундаментальные исследования*. — 2013. — № 1–2. — С. 408–412.

9. Марченко А. А. Энергоэффективное нагружение асинхронных электродвигателей в процессе послеремонтных испытаний / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 6 (28). — С. 76–83.

10. Марченко А. А. Исследование модели асинхронного электродвигателя на возможность нагружения при помощи понижения частоты питающего напряжения / А. А. Марченко, О. А. Онищенко, С. Ю. Труднев // *Вестник КамчатГТУ*. — 2014. — № 29. — С. 17–24.

MODELING OF ARTIFICIAL LOADING PROCESSING OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

In the article presents the rationale, proposed by the authors, the method of artificial loading of single-phase induction motors after repair.

The main purpose of the article is to conduct research on the functioning of the windings of electric machines under the rated current. When using the method of artificial load is possible to obtain mode, the equivalent load mod. An equivalent motor stator current in this mode will be commensurate with the nominal current. To confirm the submission, the author presents the results of a method of modeling the process of artificial loading of single-phase induction motor. The main objectives of the study are the definition of the parameters of the equivalent circuit of the electric motor, and obtaining optimal parameters of the artificial load. The results of the implementation of tasks set by the authors is the model of a single-phase induction motor, the main parameters of which coincide with the nominal, and graphics-equivalent current.

Keywords: induction motor, dynamic loading, the mode of opposition, electricity, mechanical power, switching, network frequency.

REFERENCES

1. Henao, H., G. A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, and F. Filippetti. “Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques.” *Industrial Electronics Magazine* 8.2 (2014): 31–42.

2. Bejerlejn, E. V., O. L. Rapoport, and A. B. Cukublin. “Ispytaniya asinhronnyh mashin metodom vzaimnoj nagruzki.” *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 308.7 (2005): 153–156.

3. Fedorov, M. M., and A. A. Tkachenko. “On the problem of fault monitoring system designing for induction motors.” *Electrical Engineering & Electromechanics* 2 (2006): 59–61.

4. Homutov, S. O. “Povyshenie nadezhnosti raboty asinhronnyh dvigatelej putem razrabotki metodiki i tehnikeskikh sredstv dlja opredeleniya jetalonnyh znachenij diagnosticheskogo parametra ih izoljatsii.” *Polzunovskiy vestnik* 1 (2002): 26–32.

5. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. “Modeling of dinamic loading of the asynchronous electric motor.” *Modern problems of science and education* 6 (2012): 125.

6. Saghaforia, A., H. W. Ping, M. N. Uddin, and A. Amindoust. “Teaching of simulation an adjustable speed drive of induction motor using MATLAB/Simulink in advanced electrical machine laboratory.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 103 (2013): 912–921. DOI:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

7. Voroncov, A. G., and I. V. Degtjarenko. “Modelirovanie mashin vozvratno-postupatel'nogo dejstvija na pakete Matlab.” *Kompjuternye i informacionnye tehnologii v inzhenernoj i upravlencheskoj dejatel'nosti* 2 (2000): 39–44.

8. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. “Research of dinamic loading of the asynchronous electric motor.” *Fundamental research* 1-2 (2013): 408–412.

9. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. "Power effective loading of asynchronous electric motors in the course of postrepair tests." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 76–83.

10. Marchenko, A. A., O. A. Onishchenko, and S. Yu. Trudnev. "Research of asynchronous electric motor model on loading possibility by means of underfrequency of feeding voltage." *Vestnik KamchatGTU* 29 (2014): 17–24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марченко Алексей Александрович —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
Marchello21@mail.ru
Родимов Николай Владимирович — аспирант.
Научный руководитель:
Сивоконь Владимир Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
NRLoki514@gmail.com
Труднев Сергей Юрьевич —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
trudnev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marchenko Aleksey Aleksandrovich —
Senior Lecturer.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
Marchello21@mail.ru
Rodimov Nikolaj Vladimirovich — Postgraduate.
Supervisor:
Sivokon Vladimir Pavlovich —
Dr. of Technical science, professor.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
NRLoki514@gmail.com
Trudnev Sergej Jurievich —
Senior Lecturer.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
trudnev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2015 г.